

ریسک امنیت آب - بخش سوم

امیر حسین خدائی - پژوهشگر

تغییر شگفت انگیز آبوهوا؛ از رویا تا واقعیت

آیا تا به حال به این فکر کرده‌اید که اگر انسان می‌توانست به سادگی با یک دکمه، باران را به جایی که می‌خواهد بباراند، دنیا به چه شکل‌هایی تغییر می‌کرد؟ شاید این ایده بیش از آنکه علمی به نظر برسد، شبیه به داستان‌های تخیلی باشد، اما حقیقت این است که بشر برای دهه‌هاست که در حال تلاش برای انجام این کار است. گاهی با موفقیت‌های کوچک و گاهی با نتایجی بحث‌برانگیز امروز، بیش از پنجاه کشور جهان به نوعی درگیر این فناوری هستند و مرزهای دانش در این حوزه هر روز در حال گسترش است. اما آنچه این حوزه را در سال‌های اخیر به شکلی بی‌سابقه دگرگون کرده، ورود هوش مصنوعی و فناوری‌های نوین به این عرصه است، تحولی که عملیات بارورسازی ابرها را از یک هنر مبتنی بر تجربه به یک علم دقیق و داده‌محور تبدیل کرده است. این سفر پرفرازونشیب، از آزمایش‌های ابتدایی تا پروژه‌های عظیم ملی، داستانی شنیدنی دارد که در ادامه به آن می‌پردازیم.

روش‌های کلاسیک: بذریابی ابرها

ساده‌ترین و شناخته‌شده‌ترین روش برای تغییر آبوهوا، بذریابی ابرها نام دارد که از دهه ۱۹۴۰ میلادی وجود دارد. در این روش، موادی مانند یدید نقره یا یخ خشک (دی‌اکسید کربن منجمد) را با استفاده از هواپیما، پهپاد، موشک یا توپ‌های مخصوص به درون ابرهای سرد (زیر صفر درجه) تزریق می‌کنند تا با تشکیل بلورهای یخ مصنوعی، باران یا برف ایجاد کنند. یدید نقره دارای ساختار کریستالی شبیه به یخ است و بدون نیاز به سرد کردن محیط، باعث انجماد قطره‌های ابر می‌شود. در مقابل، برای ابرهای گرم (بالای صفر درجه)، از موادی مثل نمک طعام (کلرید سدیم)، کلرید پتاسیم، کلرید کلسیم یا اوره استفاده می‌شود که با جذب رطوبت، قطرات بزرگ‌تری ساخته و باران را تسریع می‌کنند. روش‌های پراکنده‌سازی این مواد شامل ژنراتورهای زمینی، فلرهای هوایی و موشک‌های حامل مواد است.

باید توجه داشت که افزایش بارش با باران‌سازی تفاوت دارد، بذریاشی تنها زمانی مؤثر است که ابرهای مستعد بارش از قبل وجود داشته باشند و به عبارتی، نقش آن مانند نمک به غذا است، نه آفرینش غذا از هیچ. شواهد علمی نشان می‌دهد که این روش در بهترین حالت می‌تواند بارش را حدود ۱ تا ۱۰ درصد افزایش دهد و اثربخشی آن به شدت به شرایط جوی و نوع ابر وابسته است. سازمان جهانی هواشناسی (WMO, ۲۰۲۰) نیز در گزارش خود تأکید کرده که بذریاشی ابرها در شرایط خاص و با رعایت دقیق پروتکل‌ها می‌تواند مؤثر واقع شود.

پراکنده‌سازی مه

یکی دیگر از کاربردهای عملیاتی بذریاشی، از بین بردن مه در فرودگاه‌ها و بزرگراه‌هاست. در مه‌های فوق‌سرد، با ایجاد بلورهای یخ مصنوعی (با استفاده از یدید نقره یا یخ خشک)، قطرات ریز مه مصرف شده و دید افزایش می‌یابد. این روش در بسیاری از فرودگاه‌های جهان به کار گرفته شده و یکی از موفق‌ترین کاربردهای مهندسی ابرها محسوب می‌شود.

کاهش تگرگ

با تزریق مواد بارورکننده به درون ابرهای تگرگ‌زا، تعداد هسته‌های یخ افزایش می‌یابد. این امر باعث می‌شود تگرگ‌های ریزتر و تعداد بیشتری تشکیل شوند که پیش از رسیدن به زمین ذوب می‌شوند. این روش در کشورهایی مانند چین، آمریکا و روسیه به‌طور گسترده استفاده می‌شود و تجربه داکوتای شمالی نشان داده که بارورسازی در حدود ۲۰.۸ درصد موارد در کاهش تگرگ مؤثر بوده است.

انقلاب هوش مصنوعی در تغییر آب‌وهوا

شاید مهم‌ترین تحول دهه اخیر در حوزه مهندسی ابرها، ورود هوش مصنوعی به این عرصه باشد. هوش مصنوعی دیگر یک ابزار کمکی نیست، بلکه در حال تبدیل شدن به مغز متفکر عملیات بارورسازی است. اما هوش مصنوعی دقیقاً چه کاری انجام می‌دهد؟

پیش‌بینی دقیق مکان و زمان بارورسازی: سنتی‌ترین چالش در بارورسازی ابرها، تشخیص این است که کدام ابر در چه زمانی مستعد بارورسازی است. خلبانان و کارشناسان سال‌ها بر اساس تجربه و تصاویر ماهواره‌ای تصمیم‌گیری می‌کردند. اما امروز، سیستم‌های هوش مصنوعی با تحلیل هم‌زمان داده‌های ماهواره‌ها، رادارها، مدل‌های هواشناسی و حتی داده‌های تاریخی، می‌توانند مکان بارورسازی را با دقتی بی‌سابقه پیش‌بینی کنند. در امارات متحده عربی، یک سیستم هوش مصنوعی می‌تواند موقعیت مناسب برای بارورسازی را تا ۶ ساعت آینده پیش‌بینی کند. این یعنی به جای پروازهای آزمایشی، عملیات با هدفی دقیق انجام می‌شود.

افزایش دقت مدل‌های هواشناسی: شرکت هوش مصنوعی Atmo با استفاده از مدل‌های یادگیری عمیق (Deep Learning) که از بیش از ۶۰ سال داده اقلیمی تغذیه می‌شوند، مدل‌های هواشناسی را تا ۱۰۰ برابر دقیق‌تر و ۴۰,۰۰۰ برابر سریع‌تر از ابررایانه‌های سنتی ساخته است. این بدان معناست که پیش‌بینی وضعیت ابرها و تشخیص بهترین زمان برای عملیات، با سرعت و دقتی انجام می‌شود که پیش از این غیرممکن بود.

ارزیابی بلادرنگ اثربخشی: یکی از بزرگ‌ترین چالش‌های بارورسازی ابرها، پاسخ به این سوال است که آیا بارانی که باریده، نتیجه عملیات ما بوده یا پدیده‌ای طبیعی؟ هوش مصنوعی با تحلیل داده‌های رادار دوپلاریزاسیون (که می‌تواند نوع ذرات درون ابر باران، تگرگ، برف، یخ و حتی حشرات را تشخیص دهد) و مقایسه با مدل‌های پیش‌بینی، می‌تواند اثر عملیات را به‌صورت لحظه‌ای اندازه‌گیری کند.

کاهش هزینه و پروازهای غیرضروری: با پیش‌بینی دقیق‌تر، تعداد پروازهای بارورسازی که به نتیجه نمی‌رسند به شدت کاهش می‌یابد. این یعنی صرفه‌جویی قابل‌توجه در سوخت، هزینه‌ها و زمان.

سازمان جهانی هواشناسی (WMO) در نوامبر ۲۰۲۵، یازدهمین کنفرانس علمی خود را با محوریت نقش هوش مصنوعی در تغییر آب‌وهوا برگزار کرد. در این کنفرانس که با حضور بیش از ۲۲۰ دانشمند برگزار شد، موضوعات کلیدی عبارت بودند از: استفاده از هوش مصنوعی و پهپادها برای پشتیبانی از تصمیم‌گیری بلادرنگ در بارورسازی ابرها، و حرکت این حوزه از آیا تغییر آب‌وهوا کار می‌کند؟ به چگونه می‌توان آن را در سیستم‌های عملیاتی ادغام کرد؟ رسیدند.

فناوری‌های نوین: از پهپادها تا لیزرها، پلاسما و نانومواد

دنیای تغییر آب‌وهوا به سرعت در حال تحول است و روش‌های کلاسیک جای خود را به فناوری‌های پیشرفته‌تری می‌دهند.

پهپادهای بارورساز : پهپادها با مانورپذیری بالا، هزینه کمتر و قابلیت پرواز در شرایط سخت، انقلابی در عملیات بارورسازی ایجاد کرده‌اند. شرکت رینمیکر پهپادی ساخته که وزنی کمتر از ۲۵ کیلوگرم دارد و قادر است در شرایط یخ‌زدگی شدید پرواز کند. این پهپادها می‌توانند به‌صورت گروهی و با هماهنگی هوش مصنوعی عمل کنند. چین در مارس ۲۰۲۵ با ناوگانی از ۳۰ فروند هواپیما و پهپاد، عملیات بارورسازی گسترده‌ای در شمال این کشور انجام داد که منجر به افزایش ۲۰ درصدی بارش در منطقه هدف شد.

لیزرهای فوق‌کوتاه : دانشمندان دانشگاه ژنو و مراکز تحقیقاتی امارات، با استفاده از پالس‌های لیزر، کانال‌های پلاسما در هوا ایجاد می‌کنند که مانند رعدوبرق‌های میکروسکوپی عمل کرده و فرآیند تشکیل باران را تحریک می‌کنند. این روش که نیاز به مواد شیمیایی ندارد، در مرحله آزمایش‌های میدانی قرار دارد.

امواج صوتی : روشی غیرشیمیایی و کم‌هزینه که با استفاده از امواج صوتی، توزیع بارش را تحت تأثیر قرار می‌دهد و در مناطق خشک و نیمه‌خشک برای بهبود منابع آبی به کار می‌رود.

بارورسازی با پلاسما و بار الکتریکی: پژوهش‌های آزمایشگاهی نشان داده که پلاسمای فشار اتمسفر می‌تواند تشکیل هسته‌های تراکم ابر را تا چندین برابر افزایش دهد. همچنین پهپادهای مجهز به سیستم‌های تخلیه الکتریکی در امارات در حال آزمایش هستند تا با ارسال بار الکتریکی به درون ابرها، قطرات باران را تحریک کنند.

نانومواد : یکی از دغدغه‌های مهم در بارورسازی ابرها، اثرات زیست‌محیطی یدید نقره است. پژوهشگران در سال ۲۰۲۵ یک نانوکامپوزیت زیست‌سازگار ساخته‌اند که با استفاده از امواج مایکروویو و لیزر فعال می‌شود و می‌تواند تا 1.18×10^{14} ذره ماده فعال بارورسازی در هر گرم تولید کند. همچنین پروفیسور لیندا زو از دانشگاه

ویکتوریا استرالیا، با حمایت مالی ۱.۵ میلیون دلاری برنامه تحقیقاتی امارات، در حال توسعه مواد نانوساختار پیشرفته‌ای است که به‌طور ویژه برای تشکیل بلورهای یخ در ابرها طراحی شده‌اند. این مواد می‌توانند جایگزین‌های مؤثرتر و سازگارتر با محیط زیست برای دیدن نقره باشند.

کاربردهای نظامی: وقتی آب‌وهوا سلاح می‌شود

شاید باورنکردنی باشد، اما تاریخچه تغییر آب‌وهوا با اهداف نظامی به اندازه خود این فناوری قدیمی است. عملیات پاپ‌آی در جریان جنگ ویتنام، برجسته‌ترین و مستندترین پروژه نظامی در این حوزه محسوب می‌شود. بین سال‌های ۱۹۶۷ تا ۱۹۷۲، نیروی هوایی آمریکا با بیش از ۲۶,۰۰۰ پرواز و پرتاب ۴۷۴ میلیون بمب بارورکننده، ابرهای منطقه مسیر هوشی‌مین را هدف گرفت تا فصل باران‌های موسمی را تا ۴۵ روز طولانی‌تر کنند و مسیرهای تدارکاتی دشمن را به باتلاقی غیرقابل عبور تبدیل کنند. اسناد تاریخی نشان می‌دهد که این پروژه با حمایت بالاترین مقامات از جمله رئیس‌جمهور لیندون جانسون و وزیر خارجه هنری کیسینجر انجام شد.

علاوه بر این، پروژه استورفیوری از سوی نیروی دریایی آمریکا (۱۹۶۲ تا ۱۹۸۳) به دنبال تضعیف طوفان‌های دریایی بود، هرچند پژوهش‌ها بعداً نشان داد که این روش به دلیل وجود یخ طبیعی فراوان درون طوفان‌ها، موفقیت چندانی ندارد. پروژه کومولوس در بریتانیا در دهه ۱۹۵۰ نیز به بررسی تأثیر بارورسازی ابرها بر افزایش باران با کاربردهای نظامی پرداخت.

این اقدامات و نگرانی از جنگ آب‌وهوایی منجر به تصویب کنوانسیون منع استفاده از تکنیک‌های تغییر محیط برای اهداف نظامی (ENMOD) در سال ۱۹۷۶ شد. این معاهده استفاده خصمانه از تکنیک‌های تغییر محیط را که دارای اثرات گسترده، طولانی‌مدت یا شدید باشند، ممنوع کرده است. کنوانسیون به‌صراحت تغییر الگوهای آب‌وهوا (از جمله ابرها، بارش و طوفان‌ها) را در دامنه ممنوعیت خود قرار داده است. بر اساس پژوهش‌های جدید حقوقی، این کنوانسیون پتانسیل کاربرد گسترده‌تری نسبت به آنچه در گذشته تصور می‌شد دارد و می‌تواند از محیط زیست در برابر آسیب‌های عمدی دولت‌ها، به‌ویژه در زمان درگیری‌های مسلحانه، محافظت کند.

تهدیدات علیه تأسیسات آبی ایران: از جنگ تحمیلی تا جنگ‌های اخیر

در طول جنگ تحمیلی (۱۳۶۷-۱۳۵۹)، تأسیسات آبی مناطق مختلف کشور آسیب‌های قابل‌توجهی دیدند. در استان خوزستان، شهرهای مرزی از جمله آبادان، خرمشهر و دزفول شاهد تخریب گسترده شبکه‌های آبرسانی بودند. در استان‌های لرستان و کرمانشاه نیز شبکه‌های آبرسانی روستایی و شهری به‌طور قابل‌توجهی تخریب شدند.

اما در جنگ‌های اخیر (۲۰۲۶-۲۰۲۵)، تهدیدات به سطحی بی‌سابقه ارتقا یافته است. از اواخر فوریه ۲۰۲۶، حملات هوایی و سایبری مشترک آمریکا و اسرائیل به‌طور سیستماتیک ده‌ها تأسیسات انتقال و تصفیه آب را هدف قرار داد. در ژوئن ۲۰۲۵، جنگنده‌های اسرائیلی یک خط لوله اصلی انتقال آب در تهران را بمباران کردند که باعث جاری شدن آب در خیابان‌ها شد. همچنین یک کارخانه آب‌شیرین‌کن در جزیره قشم دچار اختلال گردید و ایران رسماً به یونسکو شکایت کرد. هم‌زمان، حملات سایبری گسترده‌ای بیش از ۸۰,۰۰۰ سایت را تحت تأثیر قرار داد و اسرائیل در پاسخ به حملات سایبری ایران، یک حمله متقابل علیه بندر شهید رجایی ترتیب داد. در تاریخ ۲۲ مارس ۲۰۲۶، ایران تهدید کرد که در صورت حمله به تأسیسات انرژی‌اش، به آب‌شیرین‌کن‌های کل منطقه خلیج فارس حمله خواهد کرد. این رویدادها نشان می‌دهد که تهدیدات نظامی آب به یک بعد جدید و هشداردهنده از درگیری‌های منطقه‌ای برای کاهش تاب‌آوری مردم تبدیل شده است که در آن تأسیسات آبی نه یک هدف جانبی، بلکه یکی از اهداف اصلی میدان نبرد محسوب می‌شوند.

پروژه‌های موفق در سراسر جهان: از چین تا امارات

در طول دهه‌ها، پروژه‌های متعددی در نقاط مختلف جهان با درجات متفاوتی از موفقیت به اجرا درآمده‌اند که برخی از آن‌ها به الگوهای قابل‌توجهی تبدیل شده‌اند:

چین بزرگترین برنامه تغییر آب‌وهوا در جهان را در اختیار دارد. در سال ۲۰۲۳، ناوگانی از پهپادها در سینکیانگ با استفاده از تنها ۱ کیلوگرم یدید نقره، بارش را طی یک روز بیش از ۴٪ در منطقه‌ای به وسعت ۸۰۰۰ کیلومتر مربع افزایش دادند و بیش از ۷۰,۰۰۰ مترمکعب باران اضافی تولید کردند. در سال ۲۰۲۴، استان سینکیانگ با ۱۲۳ پرواز و نزدیک به ۵۰۰۰ عملیات زمینی، موفق به افزایش ۱۴.۴۱ میلیارد مترمکعب بارش شد. چین در مارس ۲۰۲۵ نیز با ناوگانی از ۳۰ فروند هواپیما و پهپاد، عملیات باران‌بهراری را در شمال کشور

اجرا کرد. در بازی‌های المپیک پکن (۲۰۰۸)، عملیات باران‌زدایی با موفقیت از بارش باران در مراسم افتتاحیه جلوگیری کرد.

امارات متحده عربی با برنامه گسترده بارورسازی ابرها از اوایل دهه ۲۰۰۰، به یکی از موفق‌ترین نمونه‌ها در افزایش بارش در مناطق خشک تبدیل شده است. این برنامه سالانه صدها پرواز بارورسازی انجام می‌دهد و گزارش‌ها حاکی از افزایش ۱۰ تا ۳۰ درصدی بارش در برخی مناطق است. امارات در سال ۲۰۲۵ با سرمایه‌گذاری ۱.۵ میلیون دلاری برای هر پروژه، سه طرح تحقیقاتی جدید را در چهارمین دوره برنامه تحقیقاتی باران‌افزایی کلید زد که همگی بر هوش مصنوعی متمرکز هستند. همچنین آزمایش یک سیستم لیزری پرقدرت را برای ایجاد باران در شرایط خشک آغاز کرده است.

آمریکا پیشینه‌ای طولانی و متنوع در این حوزه دارد. ایالت‌هایی مانند کلرادو، یوتا و کالیفرنیا دهه‌هاست که از بارورسازی برای افزایش بارش برف در کوهستان‌ها استفاده می‌کنند. شرکت رینمیکر و آتمو نیز در سال ۲۰۲۵ اتحادی استراتژیک برای توسعه سکوی تغییر آب‌وهوا با دقت بالا تشکیل دادند.

عربستان سعودی جهش چشمگیری در بارش داشته است. مطالعه‌ای در منطقه الباحه نشان داد که عملیات بارورسازی در ماه آگوست، تعداد روزهای بارانی را از ۱.۸۷ روز به ۲.۵ روز افزایش داد و حجم بارش را به ۵۸۵٪ رساند.

در اندونزی (۲۰۱۹)، عملیات بارورسازی در جاکارتا، شدت بارندگی را ۳۸٪ کاهش داد. تایلند پروژه سلطنتی باران‌سازی خود را از دهه ۱۹۶۰ ادامه می‌دهد. ژاپن پروژه‌های بلندپروازانه با عنوان اهداف مون شات تعریف کرده که حتی کنترل تایفون را نیز در بر می‌گیرد.

هند نیز در سال ۲۰۲۵ اولین آزمایش بارورسازی با پهباد را در جیپور انجام داد و از سکوی هوش مصنوعی Hydro Trace برای شناسایی ابرهای مناسب استفاده کرد.

با این حال، تجربه کشورهای مانند رژیم صهیونیستی که برنامه خود را در ۲۰۲۱ به دلیل عدم موفقیت قابل توجه متوقف کرد، نشان می‌دهد که این فناوری نوشارو نیست و موفقیت آن به شدت به شرایط جوی و منطقه‌ای وابسته است.

وضعیت بحرانی آب در ایران و درس‌های کشورهای هم‌اقلیم

با میانگین بارش سالانه حدود ۲۵۰ میلی‌متر، ایران یکی از خشک‌ترین کشورهای جهان محسوب می‌شود. این میزان حدود یک‌سوم میانگین جهانی است (سازمان هواشناسی کشور، ۱۴۰۲). بر اساس گزارش بانک جهانی (World Bank, ۲۰۲۳)، ایران در میان ۳۶ کشور با تنش آبی بالا قرار دارد. طبق آمار وزارت نیرو، مصرف آب در ایران روزانه حدود ۲.۵ میلیارد مترمکعب است که بیش از ۹۲ درصد آن در بخش کشاورزی مصرف می‌شود. راندمان آبیاری در ایران حدود ۳۵ تا ۴۰ درصد است، در حالی که این رقم در کشورهای توسعه‌یافته به بیش از ۷۰ درصد می‌رسد (FAO, ۲۰۲۲). دمای متوسط ایران در دهه‌های اخیر حدود ۱.۵ درجه سلسیوس افزایش یافته است.

ایران نیز در سال ۲۰۲۵ گام‌های مهمی در زمینه پهنادهای بارورساز برداشته است. وزارت نیرو از آغاز ساخت پهنادهای تخصصی بارورسازی ابرها خبر داده که می‌توانند بارش را تا ۱۵ تا ۲۰ درصد افزایش دهند. این پهنادها که در سطح جهانی نوآورانه محسوب می‌شوند، با هواپیماها و تجهیزات زمینی به‌صورت هماهنگ عمل می‌کنند. همچنین چهار منطقه عملیاتی برای بارورسازی در هفته جاری تعیین شده است.

در این میان، کشورهای هم‌اقلیم ایران تجربیات ارزشمندی در مدیریت آب داشته‌اند. امارات متحده عربی با میانگین بارش کمتر از ۱۰۰ میلی‌متر در سال، سرمایه‌گذاری قابل‌توجهی در فناوری‌های شیرین‌سازی آب و بازچرخانی انجام داده است. عربستان سعودی با سرمایه‌گذاری در فناوری‌های آبی، امنیت غذایی خود را تا حدی تضمین کرده است (FAO, ۲۰۲۲). رژیم صهیونیستی از منظر علمی یکی از پیشروان جهانی در مدیریت آب است و راندمان آبیاری در این کشور به بیش از ۹۰ درصد می‌رسد و حدود ۹۰ درصد فاضلاب را تصفیه و بازچرخانی می‌کند (بانک جهانی، ۲۰۲۳).

فناوری‌های بومی مدیریت آب در ایران

ایران در سال‌های اخیر گام‌های مهمی در توسعه فناوری‌های مرتبط با مدیریت آب برداشته است. بر اساس گزارش سازمان فضایی ایران، ماهواره‌های رصد (۱۳۹۰) با قابلیت تصویربرداری با دقت بالا، پیام (۱۳۹۷) برای ارتباطات، و دوستی (۱۳۹۸) با همکاری چین، می‌توانند برای پایش تغییرات سطح آب دریاچه‌ها، پایش رطوبت خاک، و ارزیابی پوشش گیاهی استفاده شوند. همچنین، ایران دارای بیش از ۱۵۰۰ ایستگاه هواشناسی شامل ایستگاه‌های سینوپتیک، کلیماتولوژیک، باران‌سنجی و اقلیم‌شناسی است. سامانه‌های هشدار سیل و خشکسالی شامل شبکه رادارهای هواشناسی، سامانه‌های پایش رودخانه‌ها، پایش خشکسالی و هشدار سیل نیز در ایران توسعه یافته‌اند.

آینده چه خواهد شد؟

با توجه به پیشرفت‌های چشمگیر، آینده تغییر آب‌وهوا بسیار هیجان‌انگیز و در عین حال هشداردهنده است. دولت‌ها و مراکز تحقیقاتی در حال بررسی فناوری‌های محلی و منطقه‌ای هستند.

خودکارسازی کامل عملیات: ترکیب هوش مصنوعی، پهپادهای خودران و سامانه‌های ارزیابی بلادرنگ، می‌تواند به عملیات بارورسازی کاملاً خودکار منجر شود. یازدهمین کنفرانس WMO در نوامبر ۲۰۲۵ به صراحت به بررسی فعالیت‌های نیمه‌خودکار در تغییر آب‌وهوا پرداخت.

پهپادهای گروهی: محققان در حال توسعه ناوگان پهپادهای خودکار هستند که به‌صورت گروهی و هماهنگ عمل می‌کنند. این رویکرد، محدودیت‌های بار هر پهپاد را حل کرده و دقت عملیات را به شدت افزایش می‌دهد.

مهندسی اقلیم با هوش مصنوعی: فراتر از بارورسازی ابرها، پژوهشگران از یادگیری تقویتی برای کنترل توزیع غلظت ذرات در استراتوسفر به منظور کاهش گرمایش جهانی استفاده می‌کنند. همچنین ایلان ماسک در سال ۲۰۲۵ ایده‌ای بحث‌برانگیز برای استفاده از ماهواره‌های مجهز به هوش مصنوعی به منظور کاهش تابش خورشید و مقابله با گرمایش جهانی مطرح کرده است.

کنترل تایفون: ژاپن با پروژه اهداف مون شات به دنبال مهار تایفون‌ها است و دانشمندان روش‌های نظری مانند جوجیتسو آب‌وهوا را بررسی می‌کنند که با مداخلات کوچک و به‌موقع در جو، می‌توان مسیر طوفان‌ها را تغییر داد.

ژئوانجینری و خطرات امنیتی: فناوری‌های مهندسی اقلیم مانند تزریق آتروسول به استراتوسفر (SAI)، اگرچه از نظر فنی امکان‌پذیر و در دسترس بسیاری از کشورها هستند، اما تقریباً هیچ چارچوب حاکمیتی جهانی برای تنظیم چنین فعالیت‌هایی وجود ندارد. این امر انگیزه‌هایی برای اقدام یکجانبه ایجاد می‌کند که می‌تواند به درگیری‌های مسلحانه منجر شود. پژوهشگران هشدار می‌دهند که کشورها ممکن است اقدامات یکجانبه SAI را تهدیدی برای امنیت ملی تلقی کنند. همچنین سناریوهای غیرایده‌آل مانند استقرارهای رقابتی یا بدخواهانه، می‌توانند پیامدهای سیاسی و فرهنگی غیرقابل‌پیش‌بینی به همراه داشته باشند. در سطح بین‌المللی، معاهدات موجود مانند کنوانسیون چارچوب سازمان ملل درباره تغییر اقلیم UNFCCC و توافق پاریس اساساً درباره SRM (مدیریت تابش خورشیدی) چیزی نمی‌گویند و حاکمیت بر این حوزه به‌شدت پراکنده و ناقص است.

از منظر نظامی و امنیتی، کارشناسان هشدار می‌دهند که با گسترش این فناوری‌ها، ممکن است شاهد نوعی جنگ سرد اقلیمی باشیم. سازمان ملل در تلاش است تا با تدوین قوانین شفاف‌تر، از این سناریوها جلوگیری کند، اما شکاف‌های حقوقی موجود، این تلاش‌ها را با چالش مواجه کرده است.

نگاهی به نظریه‌های توطئه: هارپ (HAARP) و سلاح‌های اقلیمی

در کنار واقعیت‌های علمی، دنیای نظریه‌های توطئه درباره تغییر آب‌وهوا بسیار داغ است. پروژه هارپ (HAARP) در آلاسکا که یک تأسیسات پژوهشی برای مطالعه یونوسفر (لایه فوقانی جو) است، به‌طور مداوم هدف این نظریه‌ها بوده است. بسیاری معتقدند هارپ می‌تواند زمین‌لرزه، موج‌های گرما یا سیل ایجاد کند. با این حال، دانشمندان بارها اعلام کرده‌اند که هیچ مکانیسم شناخته‌شده‌ای برای تأثیرگذاری هارپ بر پدیده‌های جوی وجود ندارد. آب‌وهوا در تروپوسفر (۰ تا ۱۵ کیلومتری) شکل می‌گیرد، در حالی که هارپ بر یونوسفر (۶۰ تا ۵۰۰ کیلومتری) اثر می‌گذارد و این دو لایه کاملاً از هم جدا هستند. توان خروجی هارپ حدود ۳.۶ مگاوات است که از توان یک توربین بادی بزرگ (۵ مگاوات) نیز کمتر است.

یکی دیگر از مفاهیم پرکاربرد در نظریه‌های توطئه، کمپریل‌پاشی است که ادعا می‌کند خطوط تراکم هواپیماها حاوی مواد شیمیایی هستند. این ادعا نیز به‌طور کامل توسط دانشمندان رد شده است، خطوط تراکم پدیده‌ای کاملاً طبیعی ناشی از برخورد بخار آب خروجی موتور هواپیما با هوای سرد بالای جو است و از بلورهای یخ تشکیل شده، نه مواد شیمیایی.

چارچوب حقوقی و اخلاقی: مرزهای استفاده

یکی از مهم‌ترین جنبه‌های تغییر مصنوعی آب‌وهوا، چارچوب حقوقی و اخلاقی آن است. کنوانسیون منع استفاده از تکنیک‌های تغییر محیط برای اهداف نظامی یا هرگونه هدف خصمانه دیگر (ENMOD ۱۹۷۶) مهم‌ترین سند بین‌المللی در این زمینه است که استفاده خصمانه از تکنیک‌های تغییر محیط را ممنوع کرده است. کنوانسیون تغییر اقلیم سازمان ملل (UNFCCC) و توافق پاریس نیز به‌طور غیرمستقیم به این موضوع مرتبط هستند. ایران عضو کنوانسیون چارچوب سازمان ملل درباره تغییر اقلیم UNFCCC است و توافق پاریس را در سال ۱۳۹۵ تصویب کرده است.

در سال ۲۰۲۶، مجمع عمومی سازمان ملل قطعنامه‌ای تصویب کرد که بر اساس آن، کوتاهی کشورها در انجام تعهدات اقلیمی می‌تواند فعل غیرمجاز بین‌المللی محسوب شود. این قطعنامه که با ۱۴۱ رأی موافق در مقابل ۸ رأی مخالف به تصویب رسید، می‌تواند پایه‌ای حقوقی برای پیگیری کشورهایی فراهم کند که با اقدامات آب‌وهوایی خود به کشورهای دیگر آسیب می‌رسانند.

در داخل ایران، اصل ۵۰ قانون اساسی حفاظت از محیط زیست را وظیفه دولت دانسته و قوانینی مانند قانون توزیع عادلانه آب (۱۳۶۱) و قانون حفاظت و بهره‌برداری از منابع آب (۱۳۹۲) چارچوب‌های حقوقی مدیریت آب را تعیین می‌کنند.

با این حال، خلأهای جدی در چارچوب بین‌المللی وجود دارد. تفاوت میان کاربرد صلح‌آمیز و خصمانه به روشنی تعریف نشده است. همچنین، نیروهای نظامی کشورها از گزارش‌دهی انتشار کربن خود معاف هستند که این خود یک نقض بزرگ در حوزه اقلیم محسوب می‌شود و حدود ۵ تا ۶ درصد از کل انتشار جهانی مربوط

به فعالیت‌های نظامی است. بسیاری از کشورهای کلیدی نیز عضو کنوانسیون منع استفاده از تکنیک‌های تغییر محیط برای اهداف نظامی یا هرگونه هدف خصمانه دیگر ENMOD نیستند.

فرمانروایی هوشمند آب: معماری اراده ملی، از داده تا حیات

معماری ایران هوشمند آب و اقلیم تنها ساختن یک اسکلت فناورانه از حسگر و ماهواره نیست، بلکه یک فلسفه نوین برای راهبری است که روح اراده جمعی را در این کالبد می‌دمد. این چشم‌انداز، پایان دوران تصمیم‌گیری‌های متمرکز و آغاز عصر یک حکمرانی چندمرکزی است، یک ارکستر ملی پویا که در آن دولت، دانشگاه، بخش خصوصی و جوامع محلی، همگی با یک زبان و نت مشترک که همان داده‌های دقیق و شفاف است، آینده آب را می‌نوازند. این مدل که از مدیریت یکپارچه در اسرائیل، خودکفایی مطلق در سنگاپور و هیئت‌های آب محلی هلند الهام می‌گیرد، قدرت را از مرکز به خود مردم بازمی‌گرداند. در این اکوسیستم، اطلاعات دیگر یک گزارش بایگانی‌شده نیست، بلکه موتور محرک اقتصادی است که هشدار خشکسالی را به فرصتی برای کشاورز هوشمند بدل می‌کند. بدین ترتیب، افزودن این روح راهبری مشارکتی به اسکلت فناوری، آن را به یک موجود زنده، هوشمند، تطبیق‌پذیر و ثروت‌آفرین تبدیل می‌کند که قادر است نبض حیاتی این سرزمین را برای نسل‌ها تضمین نماید.

جمع‌بندی نهایی: از علم تا سیاست

تغییر مصنوعی آب و هوا دیگر یک رویا یا یک تهدید سینمایی نیست، واقعیتی علمی است که به سرعت در حال پیشرفت است. فناوری‌های امروزی مانند بذرپاشی ابرها اثربخشی محدود اما واقعی دارند و پروژه‌های موفق در چین، امارات و آمریکا نشان داده‌اند که این فناوری می‌تواند به عنوان یک ابزار مکمل ارزشمند برای مدیریت منابع آب و کاهش بلایای طبیعی عمل کند.

اما مهم‌ترین تحول این حوزه، ورود هوش مصنوعی است. هوش مصنوعی با پیش‌بینی دقیق‌تر مکان و زمان بارورسازی، ارزیابی بلادرنگ اثربخشی عملیات، و کاهش هزینه‌های غیرضروری، در حال تبدیل شدن به مغز متفکر عملیات بارورسازی ابرهاست.

فناوری‌های نوین مانند پهپادهای خودران (با قابلیت پرواز گروهی)، نانومواد (جایگزین‌های سازگار با محیط زیست برای یدید نقره)، لیزرهای فوق کوتاه، پلاسما و رادارهای دوپلاریزاسیون، همگی به کمک هوش مصنوعی، دقت و کارایی عملیات را به سطحی بی‌سابقه رسانده‌اند. ایران نیز با تولید پهپادهای بارورساز و هدف افزایش ۱۵ تا ۲۰ درصدی بارش، گام‌هایی در این مسیر برداشته است.

ایران با بحران عمیق آب و تغییرات اقلیمی دست‌وپنجه نرم می‌کند. با میانگین بارش ۲۵۰ میلی‌متر، راندمان پایین آبیاری (۳۵-۴۰٪)، و افزایش دمای ۱.۵ درجه‌ای، این کشور در میان ۳۶ کشور با تنش آبی بالا قرار دارد. تجربه کشورهای هم‌اقلیم نشان می‌دهد که سرمایه‌گذاری در فناوری‌های نوین مدیریت آب، بهبود راندمان آبیاری، و توسعه سیستم‌های بازچرخانی می‌تواند راهگشا باشد.

اما مهم‌تر از توانایی فنی، سوالات اخلاقی، حقوقی و امنیتی است که پیش روی ما قرار دارد: چه کسی تصمیم می‌گیرد آب‌وهوا را تغییر دهد؟ چگونه از سوءاستفاده نظامی از این فناوری جلوگیری کنیم؟ آیا دستکاری آب‌وهوا به نفع همه بشریت خواهد بود یا به قیمت آسیب به دیگران تمام می‌شود؟

چارچوب حقوقی موجود، از کنوانسیون ENMOD تا قطعنامه ۲۰۲۶ سازمان ملل، گام‌هایی در مسیر درست هستند، اما خلأهای جدی مانند تعریف مبهم کاربرد خصمانه و عدم عضویت بسیاری از کشورها در معاهدات کلیدی، همچنان چالش‌های بزرگی پیش‌روست. در دنیایی که تغییرات اقلیمی به یکی از بزرگ‌ترین چالش‌های بشریت تبدیل شده، توانایی تغییر آب‌وهوا می‌تواند هم نجات‌بخش و هم ویرانگر باشد و این ما هستیم که باید انتخاب کنیم از این قدرت چگونه استفاده کنیم.

۱. هیئت بین‌دولتی تغییر اقلیم (IPCC). (۲۰۲۱). "تغییر اقلیم ۲۰۲۱: مبانی علوم فیزیکی."
۲. بانک جهانی (World Bank). (۲۰۲۳). "امنیت آب در خاورمیانه."
۳. سازمان خواربار و کشاورزی ملل متحد (FAO). (۲۰۲۲). "وضعیت غذا و کشاورزی در خاور نزدیک."
۴. سازمان جهانی هواشناسی (WMO). (۲۰۲۰). "ارزیابی تغییر آب‌وهوا."
۵. سازمان جهانی هواشناسی (WMO). (۲۰۲۵). "شکل‌دهی به آینده تغییر آب‌وهوا: علم، مسئولیت و همکاری جهانی."
۶. سازمان هواشناسی کشور (۱۴۰۲). "گزارش وضعیت اقلیمی ایران."
۷. وزارت نیرو (۱۴۰۲). "سالنامه آماری بخش آب."
۸. سازمان ملل متحد - آب (UN-Water). (۲۰۲۳). "گزارش توسعه جهانی آب."
۹. برنامه توسعه سازمان ملل متحد (UNDP). (۲۰۲۳). "تغییر اقلیم و امنیت در خاورمیانه."
۱۰. مؤسسه بین‌المللی مطالعات استراتژیک (IISS). (۲۰۲۳).

۱۱. مرکز تحقیقات آب امارات (EWRC). (۲۰۲۳).

۱۲. سازمان فضایی ایران (۱۴۰۲). "گزارش عملکرد ماهواره‌های سنجش از دور."

۱۳. سازمان مدیریت بحران کشور (۱۴۰۲). "گزارش سامانه‌های هشدار سریع."

۱۴. برنامه تحقیقاتی باران‌افزایی امارات (UAERP). (۲۰۲۶-۲۰۲۵). "پروژه‌های پژوهشی ششمین دوره."

۱۵. مارتین، سی. و مور، اس. (۲۰۲۵). "جنگ‌های ژئوانجینری و حاکمیت اتمسفری." نشریه حقوق بین‌الملل
هاروارد، دوره ۶۶، شماره ۱، صفحات ۷۷-۱۵۲.

۱۶. مکلارن، دی. (۲۰۲۵). "این آب‌وهوا نیست، احمق!"؛ بررسی سناریوهای غیرایده‌آل برای توسعه
ژئوانجینری خورشیدی. "اخلاق و امور بین‌الملل."

۱۷. جاروز، جی. (۲۰۲۴). "غول خفته؟ کنوانسیون ENMOD به عنوان محدودیتی بر آسیب‌های عمدی
زیست‌محیطی در درگیری‌های مسلحانه و فراتر از آن." نشریه حقوق بین‌الملل آمریکا، دوره ۱۱۸، شماره ۳،
صفحات ۴۶۸-۵۱۱.